

Микро- и наноэлектроника. Физика конденсированного состояния  
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 538.951+ 538.955+538.956  
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-85-92>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Анизотропный магнитоэлектрический эффект в структуре цирконат–титанат свинца / магнитострикционный волоконный композит

Д.В. Савельев, Л.Ю. Фетисов<sup>®</sup>, В.И. Мусатов, М.В. Джапаридзе

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

<sup>®</sup> Автор для переписки, e-mail: fetisovl@yandex.ru

### Резюме

**Цели.** Разработка композитных структур, в которых наблюдается сильно анизотропный магнитоэлектрический (МЭ) эффект, актуальна для создания датчиков, чувствительных к направлению магнитного поля. Такой МЭ эффект может быть обусловлен анизотропией как магнитного, так и пьезоэлектрического слоя. Авторами изготовлен новый анизотропный материал – магнитострикционный волоконный композит (МВК), представляющий собой набор никелевых проволок, расположенных вплотную параллельно друг к другу в один слой и погруженных в полимерную матрицу. Цель работы – исследование линейного МЭ эффекта в композитных структурах со слоями из МВК и керамики цирконата титаната свинца (ЦТС-19).

**Методы.** Магнитострикция МВК была измерена тензометрическим методом, МЭ эффект – методом низкочастотной модуляции магнитного поля.

**Результаты.** Были изготовлены структуры с диаметрами никелевых проволок 100, 150 и 200 мкм. Измерены полевые зависимости магнитострикции МВК, а также частотные, полевые и амплитудные зависимости МЭ напряжения для случая линейного МЭ эффекта при различной величине угла между направлением магнитного поля и проволоками. Показано, что все образцы обладают сильной анизотропией относительно направления магнитного поля. МЭ напряжение уменьшается от максимального значения до нуля при изменении направления магнитного поля с параллельного до перпендикулярного относительно волокон никеля.

**Выводы.** Наибольшим по величине МЭ коэффициентом, составляющим 1.71 В/(Э · см), обладает структура, изготовленная на основе МВК с диаметром проволоки 150 мкм. Частота резонанса растет от 3.5 кГц до 6.5 кГц с увеличением диаметра проволок. Величина магнитострикции МВК сопоставима по величине с магнитострикцией пластины никеля такой же толщины.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический эффект, магнитострикция, волоконные композиты, пьезоэффект, анизотропия

• Поступила: 03.12.2021 • Доработана: 15.02.2022 • Принята к опубликованию: 20.04.2022

**Для цитирования:** Савельев Д.В., Фетисов Л.Ю., Мусатов В.И., Джапаридзе М.В. Анизотропный магнитоэлектрический эффект в структуре цирконат–титанат свинца / магнитострикционный волоконный композит. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):85–92. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-85-92>

**Прозрачность финансовой деятельности:** Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

# Anisotropic magnetoelectric effect in lead zirconate titanate and magnetostrictive fiber composite structures

Dmitriy V. Saveliev, Leonid Y. Fetisov<sup>@</sup>, Vladimir I. Musatov, Mikhail V. Dzhaparidze

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

<sup>@</sup> Corresponding author, e-mail: fetisovl@yandex.ru

## Abstract

**Objectives.** The development of composite structures in which a strongly anisotropic magnetoelectric (ME) effect is observed is relevant for the creation of sensors that are sensitive to the direction of the magnetic field. Such an ME effect can arise due to the anisotropy of both the magnetic and the piezoelectric layers. In this work, a new anisotropic material named as a magnetostrictive fiber composite (MFC), comprising a set of nickel wires placed closely parallel to each other in one layer and immersed in a polymer matrix, is manufactured and studied. The study aimed to investigate the linear ME effect in a structure comprising of a new magnetic material, MFC, and lead zirconate titanate (PZT-19).

**Methods.** The magnetostriction for the MFC structure was measured using the strain-gauge method; the ME effect was determined by low-frequency magnetic field modulation.

**Results.** Structures with nickel wire diameters of 100, 150, and 200  $\mu\text{m}$  were fabricated. The MFC magnetostriction field dependences were determined along with the frequency-, field-, and amplitude dependences of the ME voltage in the case of linear ME effect. Measurements were carried out at various values of the angle between the direction of the magnetic field and the wires. All samples demonstrated strong anisotropy with respect to the direction of the magnetic field. When the magnetic field orientation changes from parallel to perpendicular with respect to the nickel wire axes, the ME voltage decreases from its maximum value to zero.

**Conclusions.** The largest ME coefficient 1.71 V/(Oe · cm) was obtained for a structure made of MFC with a wire diameter of 150  $\mu\text{m}$ . With increasing wire diameter, the resonance frequency increases from 3.5 to 6.5 kHz. The magnetostriction of the MFC is comparable in magnitude to that of a nickel plate having the same thickness.

**Keywords:** magnetoelectric effect, magnetostriction, fiber composites, piezoelectric effect, anisotropy

• Submitted: 03.12.2021 • Revised: 15.02.2022 • Accepted: 20.04.2022

**For citation:** Saveliev D.V., Fetisov L.Y., Musatov V.I., Dzhaparidze M.V. Anisotropic magnetoelectric effect in lead zirconate titanate and magnetostrictive fiber composite structures. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):85–92. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-85-92>

**Financial disclosure:** The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Магнитоэлектрические (МЭ) эффекты в слоистых композитных структурах, содержащих ферромагнитные (ФМ) и пьезоэлектрические (ПЭ) слои, позволяют осуществлять взаимное преобразование магнитных и электрических полей. Это, в свою очередь, дает возможность на их основе создавать датчики переменных и постоянных магнитных полей, автономные источники энергии, управляемые устройства электроники (индукторы и трансформаторы), антенны, новые типы магнитной памяти и др. [1–3]. МЭ эффекты в таких структурах

возникают в результате комбинации магнитоэлектрического эффекта в ФМ слое и пьезоэлектрического эффекта в ПЭ слое [4]. При помещении МЭ структуры во внешнее магнитное поле  $h$  ФМ слой деформируется вследствие магнитоэлектрического эффекта. Эти деформации передаются пьезоэлектрику через механическую связь между слоями, и он генерирует электрическое поле  $e$  вследствие пьезоэлектрического эффекта. Для описания эффективности МЭ эффекта был введен соответствующий коэффициент  $\alpha_E = e/h = u/(b \cdot h)$ , где  $b$  – толщина пьезоэлектрика;  $u$  – электрическое напряжение, генерируемое между электродами ПЭ слоя, возникающее под действием переменного магнитного поля  $h$ .

При изучении МЭ эффектов основное внимание уделялось их исследованию в изотропных слоистых композитных структурах, в которых величина эффекта не зависит от направления приложения магнитного поля  $H$  в плоскости таких структур. Однако в некоторых случаях, например, для датчиков магнитных полей, чувствительных к направлению магнитного поля, создание анизотропных МЭ композитов является актуальной задачей. Для решения этой задачи можно использовать либо ФМ слои с анизотропной магнитоотриксцией, либо ПЭ слои с анизотропным пьезоэффектом. Анизотропный МЭ эффект наблюдался в структурах, где в качестве магнитного слоя использовали монокристалл феррита кобальта  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  [5], а в качестве ПЭ слоев – монокристалл магнионикобат-титанат свинца (PMN-PT) [6], никобат лития  $\text{LiNbO}_3$  и фосфат галлия  $\text{GaPO}_4$  [7]. Анизотропия магнитоотриксции может быть искусственно создана в процессе изготовления структуры. Также анизотропный МЭ эффект наблюдался в гетероструктурах, изготовленных из слоев пьезоэлектрической керамики цирконата-титаната свинца (ЦТС,  $\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ ,  $0 \leq x \leq 1$ ) и ФМ керамики  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ . Одноосная магнитная анизотропия создавалась в ФМ слое такой структуры с помощью приложения внешнего давления к слою в процессе изготовления [8].

Анизотропия МЭ эффекта также наблюдалась в структурах, в которых использовали пьезоволоконные композиты (ПВК), изготовленные компанией Smart Materials Corporation (Сарасота, Флорида, США) [9, 10]. ПВК представляет собой набор стержней, изготовленных из пьезоэлектрической керамики, расположенных параллельно друг другу в плоскости и помещенных в полимерную матрицу. Этот материал получил широкое распространение из-за большого размера пьезоэлектрического модуля, гибкости и относительно низкой стоимости.

Недавно был предложен новый тип сильно анизотропного магнитного материала – магнитоотриксционные волоконные композиты (МВК). Они содержат набор проволок, изготовленных из магнитного

материала (аморфные микропровода или никель), расположенных параллельно друг другу на разном расстоянии и помещенные в полимерную матрицу [11, 12]. Использование такого материала в качестве ФМ слоя в слоистых композитах позволило получить сильно анизотропный МЭ эффект. Сильная анизотропия таких структур относительно направления внешнего магнитного поля (вдоль проволок или поперек) обусловлена размагничивающим фактором.

Авторами изготовлены несколько образцов МВК на основе проволок никеля разного диаметра и исследованы их магнитоотриксционные характеристики. Обнаружен и исследован сильно анизотропный МЭ эффект в структурах МВК–ЦТС. Получены частотные, полевые и угловые зависимости МЭ эффекта в таких композитных структурах.

### ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Исследования МЭ эффекта проводили в двухслойных композитных структурах, содержащих слои различных МВК и пьезокерамики ЦТС. МВК представляет собой набор проволок никеля, расположенных параллельно и вплотную друг к другу в один слой и помещенных в полимерную матрицу. Было изготовлено три образца МВК с проволоками различного диаметра: 100 мкм (образец 1), 150 мкм (образец 2), 200 мкм (образец 3). В качестве матрицы использовали самополимеризующийся клей БФ-2 на основе формальдегидной смолы. Размеры структур в плоскости составляли соответственно  $9.2 \times 8.9 \text{ мм}^2$ ,  $9.7 \times 9.4 \text{ мм}^2$ ,  $8.4 \times 8.3 \text{ мм}^2$ . Толщины МВК равнялись диаметру проволок. Внешний вид МВК показан на рис. 1а. Магнитоотриксция всех МВК составляла  $\sim 34 \cdot 10^{-6}$ . При описании результатов измерений в работе использованы подстрочные индексы 1, 2 и 3, обозначающие МВК с диаметром проволоки 100 мкм, 150 мкм и 200 мкм соответственно.

В качестве ПЭ слоя были использованы коммерчески доступные диски ЦТС-19 (Audiowell Electronics (Guangzhou) Co. Ltd., Китай) состава  $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$

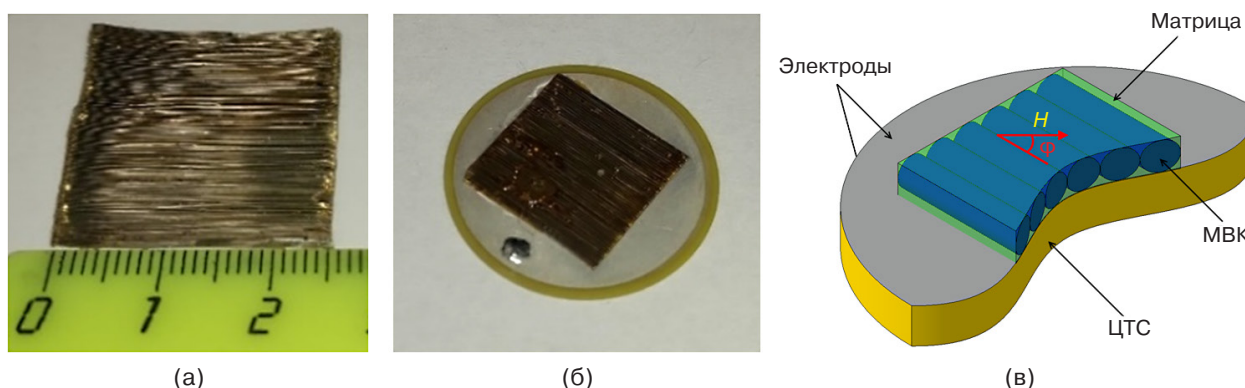


Рис. 1. Образцы МВК (а), ЦТС–МВК диаметром 150 мкм (б) и структура ЦТС–МВК (в)

диаметром 16 мм и толщиной 200 мкм. На противоположные стороны диска были нанесены серебряные электроды, и диск был поляризован в поперечном направлении. Фотографии изготовленных структур МВК и ЦТС–МВК приведены на рис. 1. Слои МВК и ЦТС были соединены с помощью цианакрилатного клея. Структуры подвешивали в магнитном поле в двух точках, расположенных на противоположных сторонах диска ЦТС, с помощью специального держателя, позволявшего поворачивать их относительно направления магнитного поля. Согласно принятой классификации композитов исследованные в работе структуры относятся к МЭ композитам со связностью «1–2» [13].

МЭ эффект в структурах исследовали методом низкочастотной модуляции магнитного поля на установке, описанной в работе [12]. Структуру помещали между полюсами электромагнита в постоянное магнитное поле  $H$  в диапазоне  $\pm 1$  кЭ, направленное в плоскости структуры. Электромагнит подключали к источнику питания TDK Lambda GENH600-1.3 (Япония). Возбуждающее переменное магнитное поле  $h \cos(2\pi ft)$ , амплитудой до  $h = 0.8$  Э создавали с помощью катушек Гельмгольца, подключенных к генератору колебаний произвольной формы Agilent 33210A (Agilent Technologies, Санта-Клара, Калифорния, США). Поле  $h$  было параллельно полю  $H$ . Генерируемое между электродами пьезо-керамики МЭ напряжение  $u(f)$  измеряли с помощью вольтметра АКИП 2401 (Китай) с входным сопротивлением 10 МОм при различных значениях  $f$ ,  $h$ ,  $\varphi$ ,  $H$  и различных ориентациях  $H$  относительно оси проводов МВК. Зависимости магнитострикции МВК от магнитного поля при различных углах между направлением поля и направлением волокон измеряли тензометрическим методом с помощью оригинальной установки, описанной в работе [14].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сначала были исследованы полевые и угловые зависимости магнитострикции МВК. На рис. 2 приведены полевые зависимости магнитострикции МВК с различными диаметрами волокон для случая, когда магнитное поле направлено вдоль проволок. Видно, что в измеряемом диапазоне образцы 2 и 3 достигли насыщения  $\sim (-34 \cdot 10^{-6})$ , в то время как образец 1 имеет значение  $\sim (-23 \cdot 10^{-6})$ . Поскольку величина магнитострикции образца 1 не достигает насыщения, то далее в тексте оно будет называться максимальным. Магнитное поле насыщения уменьшается от более чем 1 кЭ до  $\sim 0.4$  кЭ при увеличении диаметра волокон от 100 мкм до 200 мкм. При этом видно, что величина магнитострикции МВК на основе проволок диаметром 150 мкм растет быстрее, чем для

образца с толщиной проволоки 200 мкм. Влияние на величину магнитострикции, по-видимому, оказывают как размагничивающий фактор, так и механические напряжения со стороны матрицы.

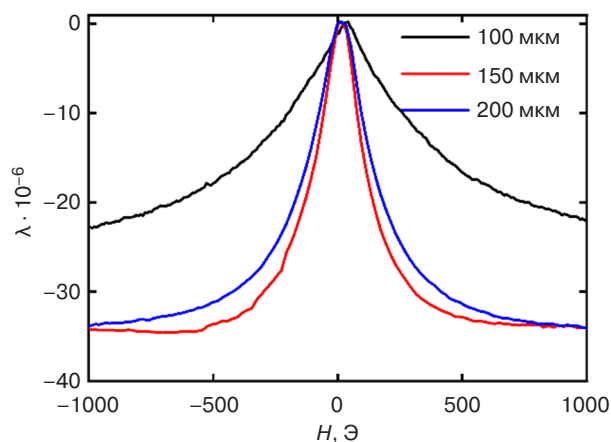


Рис. 2. Зависимость магнитострикции для изготовленных образцов МВК с различным диаметром проволоки от магнитного поля

На рис. 3 приведены измеренные зависимости максимальной магнитострикции от величины угла между направлением магнитного поля  $H$  и проволоками никеля в полях до 1 кЭ. Для всех образцов МВК наблюдалась сильная анизотропия относительно направления магнитного поля. Максимальная магнитострикция уменьшается практически до нулевого значения при увеличении угла между направлением магнитного поля и проволоками до  $90^\circ$ . Зависимость симметрична относительно нуля.

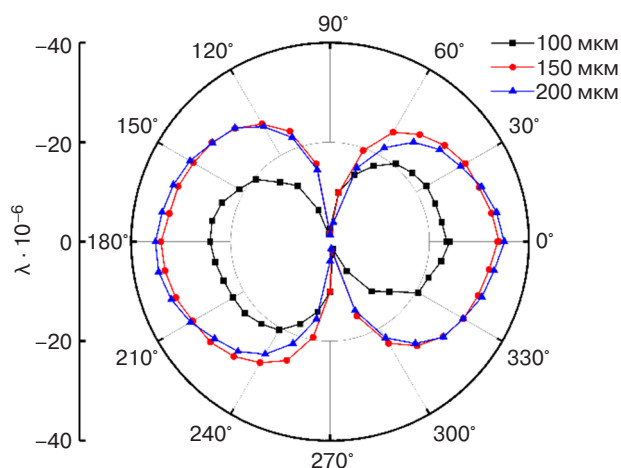
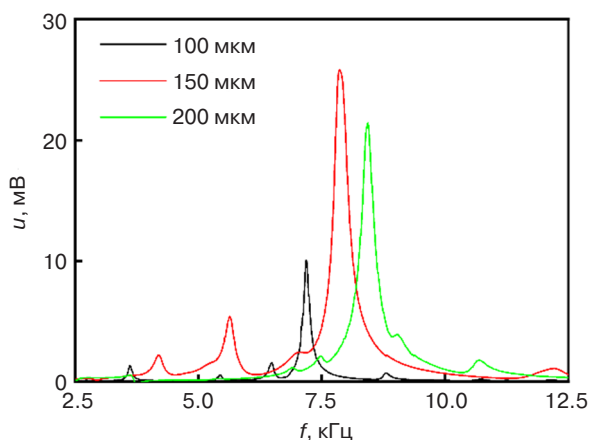


Рис. 3. Зависимость магнитострикции МВК от угла между направлением магнитного поля и направлением проволок для всех образцов

Далее были проведены измерения МЭ эффекта в структурах МВК–ЦТС. На рис. 4 приведены частотные зависимости МЭ напряжения  $u(f)$ , полученные для всех трех структур. Измерения проводили при  $h \sim 0.75$  Э и оптимальных значениях напряженности



магнитного поля  $H_m$  ( $H_m$  – это поле, в котором значение МЭ напряжения максимально для каждого образца). Структуры намагничивали вдоль проволок никеля.



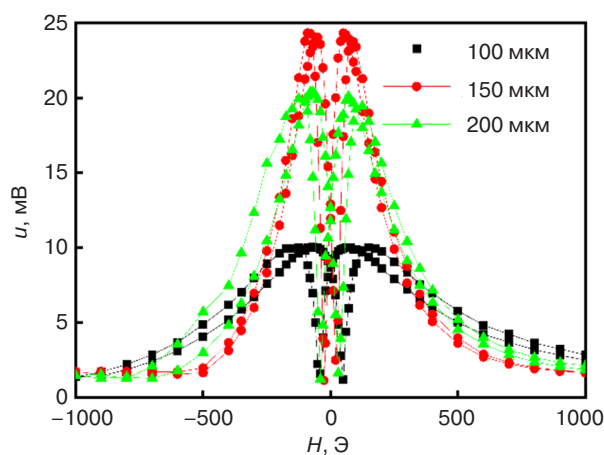
**Рис. 4.** Зависимость МЭ напряжения от частоты, измеренные в магнитном поле, направленном параллельно проволокам

На зависимостях видны пики на частотах изгибного резонанса структур. Для образца 1 высота пика составила  $u_1 = 10.1$  мВ на частоте  $f_1 \approx 7.2$  кГц, для образца 2:  $u_2 = 25.9$  мВ на частоте  $f_2 \approx 7.9$  кГц и для образца 3:  $u_3 = 21.5$  мВ на частоте  $f_3 \approx 8.4$  кГц. Видно, что резонансная частота структур растет с увеличением диаметра проволок МВК. Высоты пиков линейно росли с увеличением амплитуды возбуждающего поля  $h$ . Добротности резонансов составили  $Q_1 \approx 72$ ,  $Q_2 \approx 33$ ,  $Q_3 \approx 32$ . Для каждого пика были рассчитаны значения МЭ коэффициента по формуле  $\alpha = u/(t \cdot h)$ . Здесь  $u$  – амплитуда генерируемого структурой МЭ напряжения,  $t$  – толщина слоя ЦТС,  $h$  – амплитуда переменного магнитного поля. Рассчитанные величины МЭ коэффициентов на резонансных частотах составили  $\alpha_1 = 0.61$  В/(Э · см),  $\alpha_2 = 1.71$  В/(Э · см) и  $\alpha_3 = 1.53$  В/(Э · см). Полученные коэффициенты сравнимы с коэффициентами, полученными в структурах ЦТС–никель [15], но существенно меньше МЭ коэффициентов  $\alpha_E \sim 10^2$  В/(Э · см) для пленочных структур Metglas–AlN [16]. Параметры резонансов, полученные из данных рис. 3, приведены в таблице.

**Таблица.** Параметры резонансного МЭ эффекта в структурах ЦТС–МВК

Параметр	100 мкм	150 мкм	200 мкм
МЭ напряжение $u$ , мВ	10.1	25.9	21.5
МЭ коэффициент $\alpha$ , В/(Э · см)	0.6	1.7	1.5
Частота резонанса $f$ , кГц	7.2	7.9	8.4
Добротность $Q$	72	33	32

На рис. 5 приведены зависимости МЭ напряжения от магнитного поля  $H$ , направленного вдоль проволок. Измерения проводили на соответствующих резонансных частотах, характерных для каждого образца в переменном магнитном поле амплитудой  $h = 0.75$  Э. Видно, что для всех образцов зависимости имели типичный вид: напряжение сначала растет с увеличением поля  $H$ , достигает максимума в поле  $H_m$ , соответствующем максимуму пьезомагнитного коэффициента ( $q = dN/dH_{||}$ ), а затем падает практически до нуля при насыщении магнитоэлектрики. Величины полей  $H_m$  для каждого образца были разными и на начальном участке составляли  $H_{m1} \approx 70$  Э,  $H_{m2} \approx 50$  Э и  $H_{m3} \approx 70$  Э соответственно. У всех кривых наблюдался гистерезис. Максимальные амплитуды напряжений соответствовали значениям, приведенным на рис. 4. Величины коэрцитивных полей  $H_c$  для образцов 1–3 составляли  $H_{c1} = 45$  Э,  $H_{c2} = 25$  Э и  $H_{c3} = 35$  Э соответственно.



**Рис. 5.** Зависимость МЭ напряжения от магнитного поля  $H$  на частоте резонанса

На следующем этапе были исследованы зависимости МЭ эффекта от угла  $\phi$  между направлением магнитного поля и осью проволок («угловые зависимости»), который изменяли в диапазоне от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ . Измерения показали, что при увеличении этого угла величина максимального МЭ напряжения уменьшается и практически достигает нуля при  $\phi = 90^\circ$ , что соответствует угловым зависимостям магнитоэлектрики, приведенным на рис. 3. В то же время для каждого образца наблюдается увеличение значения магнитного поля  $H_m$ , при котором МЭ напряжение достигает максимального значения, что объясняется влиянием размагничивающего фактора. На основании полученных результатов были построены угловые диаграммы МЭ напряжения в поле  $H_m$  на частоте резонанса для всех исследованных образцов, приведенные на рис. 6. Видно, что формы зависимостей качественно совпадают для всех образцов. Максимальное значение напряжения наблюдалось при значении угла  $\phi = 0^\circ$ . При увеличении его значения до  $90^\circ$  МЭ напряжение

уменьшалось практически до нуля. Таким образом, все образцы обладают сильной анизотропией МЭ эффекта по отношению к направлению магнитного поля.

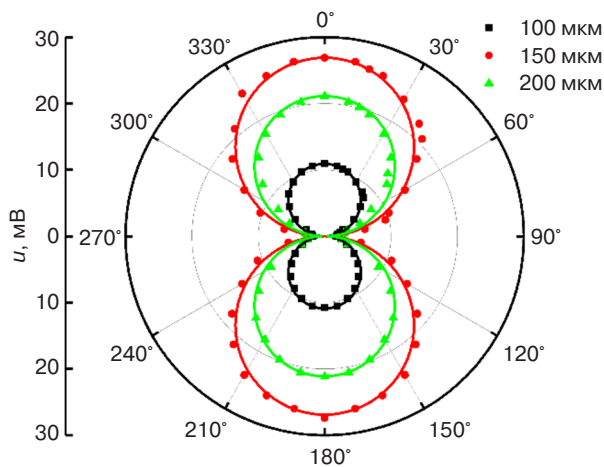


Рис. 6. Зависимости МЭ напряжения от угла между направлением магнитного поля и осью проволок

На рис. 7 приведены зависимости МЭ напряжения от амплитуды переменного магнитного поля, измеренные на частоте резонанса структур для параллельной ориентации поля  $H_m$ . Видно, что зависимости линейны во всем диапазоне амплитуд переменных магнитных полей. Чувствительность структур к магнитному полю  $u/h$  составила  $u_1/h_1 \approx 12.4$  мВ/Э для структуры 1;  $u_2/h_2 \approx 35.0$  мВ/Э – для структуры 2;  $u_3/h_3 \approx 29.9$  мВ/Э – для структуры 3.

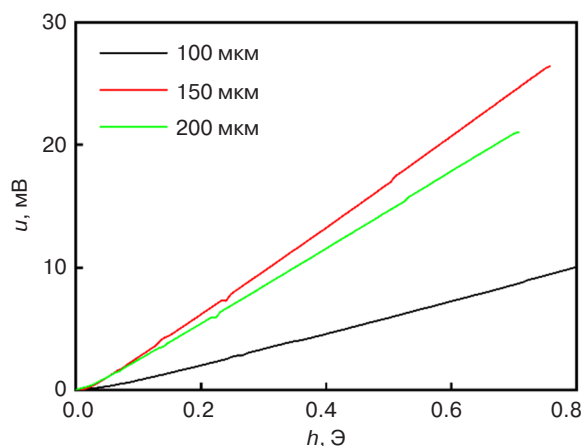


Рис. 7. Зависимости МЭ напряжения от амплитуды переменного магнитного поля для образцов на основе МВК различного диаметра

Частоты изгибных колебаний структуры в форме диска можно оценить, используя следующую формулу [17]:

$$f = k_{ns} \cdot \frac{a}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{Y}{12\rho}}, \quad (1)$$

где  $k_{ns}$  – константа,  $n$  – количество узловых диаметров,  $s$  – количество узловых окружностей,  $a$  – толщина диска,

$R$  – радиус диска,  $Y$  – модуль Юнга,  $\rho$  – плотность. Используя известные значения параметров материалов:  $Y_m = 210$  ГПа,  $\rho_m = 8.9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $Y_p = 59.5$  ГПа,  $\rho_p = 7.4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и размеры структуры, получим значения частот  $f_1 \approx 7$  кГц,  $f_2 \approx 8.2$  кГц и  $f_3 \approx 8.3$  кГц. Найденные частоты хорошо совпадают с измеренными. Расчеты показали, что резонансная частота растет с увеличением диаметра проволок никеля, что также согласуется с измерениями.

Амплитуда МЭ напряжения, генерируемого двухслойной структурой ФМ–ПЭ в линейном режиме, задается формулой [18, 19]:

$$u = A Q \frac{d_{31}}{\epsilon} q h, \quad (2)$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от размеров, механических и диэлектрических параметров слоев структуры,  $Q$  – акустическая добротность,  $d_{31}$  – пьезомодуль ПЭ слоя,  $q = \lambda^{(1)} = \partial \lambda / \partial H|_H$  – пьезомагнитный коэффициент,  $\lambda(H)$  – зависимость магнитострикции ФМ слоя от магнитного поля, а  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость ПЭ слоя. Из формулы (2) следует, что форма зависимости МЭ напряжения  $u(H)$  от постоянного магнитного поля в значительной степени определяется полевой зависимостью  $\lambda^{(1)}(H)$ . Поэтому форма угловой зависимости МЭ напряжения совпадает с формой угловой зависимости магнитострикции МВК.

На рис. 8 приведены рассчитанные методом численного дифференцирования зависимости пьезомагнитного модуля  $q$  для трех образцов МВК, построенные по данным рис. 2. Максимумы пьезомагнитных модулей составили  $q_1 \approx 0.06$  Э<sup>-1</sup>,  $q_2 \approx 0.21$  Э<sup>-1</sup> и  $q_3 \approx 0.17$  Э<sup>-1</sup> в полях 60–80 Э. Видно, что максимальное значение соответствовало образцу с диаметром проволок 150 мкм, что, в свою очередь, привело к тому, что для данного образца наблюдается максимальное значение МЭ напряжения  $u$  (см. рис. 4).

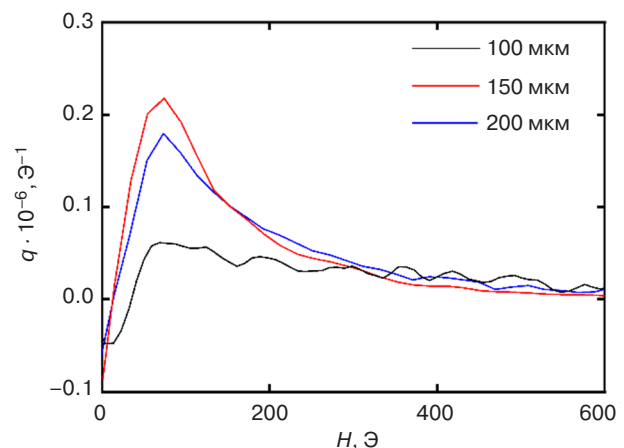


Рис. 8. Зависимость пьезомагнитного модуля МВК от магнитного поля для проволок различного диаметра

Анизотропия магнитоотрицательности МВК обусловлена размагничивающим фактором. Известно, что поле внутри ферромагнитного образца  $H_{in}$  в общем случае неоднородно и связано с внешним полем  $H$  как

$$H_{in} \approx H - N \cdot M(H_{in}), \quad (4)$$

где  $N$  – размагничивающий фактор, зависящий от формы образца и направления поля;  $M$  – усредненная намагниченность образца, зависящая от поля внутри ФМ слоя  $H_{in}$  [20]. Для длинного никелевого стержня при намагничивании его вдоль оси величина  $N \approx 0$ , а при намагничивании поперек оси –  $N \approx 0.5$ , т.е. при намагничивании никелевого стержня вдоль оси поле  $H_{in}$  практически равно  $H$ , а при намагничивании поперек оси поле  $H_{in}$  много меньше  $H$ . Поскольку величина магнитоотрицательности  $\lambda$  определяется именно внутренним полем  $H_{in}$ , для достижения максимального коэффициента  $\lambda^{(1)}(H)$  при намагничивании никелевого стержня поперек оси следует приложить гораздо большее поле. Кроме того, в общем случае, необходимо учитывать диполь-дипольное взаимодействие между проводниками внутри матрицы, которое зависит от расстояния между ними.

Отметим, что такого рода структуры обладают большим преимуществом по сравнению с традиционными магнитными материалами. Характеристиками МЭ эффектов в них можно управлять, изменяя расстояние между проволоками МВК, их диаметр, материал проволок и матрицы. Эти вопросы требуют дальнейшего исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе обнаружен и исследован линейный МЭ эффект в двухслойных композитных структурах МВК–ЦТС. Образцы МВК представляют собой набор расположенных параллельно друг другу в один слой проволок никеля разного диаметра в полимерной матрице. Измерены частотные и полевые характеристики структур с проволоками диаметром

100–200 мкм на частоте изгибного резонанса. Показано, что частота резонанса растет от 7.2 кГц до 8.4 кГц с увеличением диаметра проволок. Наибольший МЭ коэффициент 1.7 В/(Э · см) получен для образца с диаметром проволок никеля 150 мкм и сопоставим с МЭ коэффициентом, полученным для структуры сравнимой толщины с ФМ слоем из поликристаллического никеля. Величина МЭ эффекта сильно зависит от ориентации постоянного магнитного поля  $H$  вследствие анизотропии магнитоотрицательности МВК.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 20-32-90-190.

### Вклад авторов

**Д.В. Савельев** – описание методики исследования, подготовка исследуемых образцов и установок, проведение исследований, хранение данных, подготовка графических материалов, написание текста статьи.

**Л.Ю. Фетисов** – постановка задачи, описание методики исследования, подготовка исследуемых образцов и установок, проведение исследований, проверка данных, написание текста статьи.

**В.И. Мусатов** – подготовка исследуемых образцов и установок, проведение исследований, хранение данных, написание текста статьи.

**М.В. Джапаридзе** – подготовка исследуемых образцов и установок, проведение исследований.

### Authors' contributions

**D.V. Saveliev** – description of the research methodology, preparing test samples and installations, conducting research, data curation, visualization, and writing the text of the article.

**L.Y. Fetisov** – conceptualization, description of the research methodology, preparing test samples and installations, conducting research, validation, and writing the text of the article.

**V.I. Musatov** – preparing test samples and installations, conducting research, data curation, and writing the text of the article.

**M.V. Dzhabaridze** – preparing test samples and installations and conducting research.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Wang Y., Li J., Viehland D. Magnetoelectrics for magnetic sensor applications: status, challenges and perspectives *Mater. Today*. 2014;17(269):269–275. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.05.004>
2. Liang X., Matyushov A., Hayes P., Schell L., Dong C., Chen H., He Y., Will-Cole A., Quandt E., Martins P., McCord J., Medarde M., Lanceros-Mendez S., van Dijken S., Sun N.X., Sort J. Roadmap on magnetoelectric materials and devices. *IEEE Trans. Mag.* 2021;57(8):400157. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3086635>
3. He Y., Luo B., Sun N.-X. Integrated magnetism and magnetoelectrics for sensing, power, RF, and microwave electronics. *IEEE J. Microw.* 2021;4:908–929. <https://doi.org/10.1109/JMW.2021.3109277>
4. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status and future directions. *J. Appl. Phys.* 2008;103(3):031101. <https://doi.org/10.1063/1.2836410>
5. Oh Y.S., Crane S., Zheng H., Chu Y.H., Ramesh R., Kim K.H. Quantitative determination of anisotropic magnetoelectric coupling in  $\text{BiFeO}_3\text{--CoFe}_2\text{O}_4$  nanostructures. *Appl. Phys. Lett.* 2010;97(5):052902. <https://doi.org/10.1063/1.3475420>
6. Vargas J.M., Gómez J. In-plane anisotropic effect of magnetoelectric coupled PMN-PT/FePt multiferroic heterostructure: Static and microwave properties. *APL Mater.* 2014;2(10):106105. <https://doi.org/10.1063/1.4900815>

7. Vidal J.V., Timopheev A.A., Kholkin A.L., Sobolev N.A. Anisotropy of the magnetoelectric effects in tri-layered composites based on single-crystalline piezoelectrics. *Vacuum*. 2015;122(B):286–292. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.06.022>
8. Aubert A., Loyau V., Mazaleyrat F., LoBue M. Enhancement of the magnetoelectric effect in multiferroic  $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{PZT}$  bilayer by induced uniaxial magnetic anisotropy. *IEEE Trans. Magn.* 2017;53(11):8109405. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2696162>
9. Bent A.A., Hagood N.W. Piezoelectric fiber composites with interdigitated electrodes. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 1997;8(11):903–919. <https://doi.org/10.1177/1045389X9700801101>
10. Burdin D., Chashin D., Ekonomov N., Fetisov L., Fetisov Y., Shamonin M. DC magnetic field sensing based on the nonlinear magnetoelectric effect in magnetic heterostructures. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016;49(37):375002. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/37/375002>
11. Amirov A., Baraban I., Panina L., Rodionova V. Direct magnetoelectric effect in a sandwich structure of PZT and magnetostrictive amorphous microwires. *Materials*. 2020;13(4):916. <https://doi.org/10.3390/ma13040916>
12. Fetisov Y., Chashin D., Saveliev D., Fetisov L., Shamonin M. Anisotropic magnetoelectric effect in a planar heterostructure comprising piezoelectric ceramics and magnetostrictive fibrous composite. *Materials*. 2019;12(19):3228. <https://doi.org/10.3390/ma12193228>
13. Newnham R.E., Skinner D.P., Cross L.E. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites. *Mater. Res. Bull.* 1978;13(5):525–536. [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(78\)90161-7](https://doi.org/10.1016/0025-5408(78)90161-7)
14. Chashin D.V., Burdin D.A., Fetisov L.Y., Ekonomov N.A., Fetisov Y.K. Precise measurements of magnetostriction of ferromagnetic plates. *J. Siberian Federal Univ. Math. & Phys.* 2018;11(1):30–34. <https://doi.org/10.17516/1997-1397-2018-11-1-30-34>
15. Feng M., Wang J.-J., Hu J.-M., Wang J., Ma J., Li H.-B., Shem Y., Lin Y.-H., Chen L.-Q., Nan C.-W. Optimizing direct magnetoelectric coupling in  $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3/\text{Ni}$  multiferroic film heterostructures. *Appl. Phys. Lett.* 2015;106(7):072901. <https://doi.org/10.1063/1.4913471>
16. Greve H., Woltermann E., Quenzer H.J., Wagner B., Quandt E. Giant magnetoelectric coefficients in  $(\text{Fe}_{90}\text{Co}_{10})_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$ -AlN thin film composites. *Appl. Phys. Lett.* 2010;96(18):182501. <https://doi.org/10.1063/1.3377908>
17. Timoshenko S. *Vibration Problems in Engineering*. New York: D. Van Nostrand Company, Inc.; 1961. 468 p.
18. Fetisov L.Y., Fetisov Y.K., Sreenivasulu G., Srinivasan G. Nonlinear resonant magnetoelectric interactions and efficient frequency doubling in a ferromagnetic-ferroelectric layered structure. *J. Appl. Phys.* 2013;113(11):116101. <https://doi.org/10.1063/1.4798579>
19. Bichurin M.I., Petrov V.M., Srinivasan G. Theory of low-frequency magnetoelectric coupling in magnetostrictive-piezoelectric bilayers. *Phys. Rev. B*. 2003;68(5):054402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.68.054402>
20. Joseph R.I., Schlömann E. Demagnetizing field in nonellipsoidal bodies. *J. Appl. Phys.* 1965;36(5):1579–1593. <https://doi.org/10.1063/1.1703091>

## Об авторах

**Савельев Дмитрий Владимирович**, аспирант кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dimsav94@gmail.com. Scopus Author ID 57196479660, ResearcherID D-8952-2019, <https://orcid.org/0000-0001-7762-9198>

**Фетисов Леонид Юрьевич**, д.ф.-м.н., доцент кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: fetisovl@yandex.ru. Scopus Author ID 26431336600, ResearcherID D-1163-2013, <https://orcid.org/0000-0002-3699-4321>

**Мусатов Владимир Иванович**, студент кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: musatov\_vovak@mail.ru. Scopus Author ID 57416814900, <https://orcid.org/0000-0002-2995-8824>

**Джапаридзе Михаил Валерьевич**, аспирант кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mvd-1997@yandex.ru. Scopus Author ID 57395288400, <https://orcid.org/0000-0001-7714-2742>

## About the authors

**Dmitriy V. Saveliev**, Postgraduate Student, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dimsav94@gmail.com. Scopus Author ID 57196479660, ResearcherID D-8952-2019, <https://orcid.org/0000-0001-7762-9198>

**Leonid Y. Fetisov**, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: fetisovl@yandex.ru. Scopus Author ID 26431336600, ResearcherID D-1163-2013, <https://orcid.org/0000-0002-3699-4321>

**Vladimir I. Musatov**, Student, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: musatov\_vovak@mail.ru. Scopus Author ID 57416814900, <https://orcid.org/0000-0002-2995-8824>

**Mikhail V. Dzhabaridze**, Postgraduate Student, Department of Nanoelectronics Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mvd-1997@yandex.ru. Scopus Author ID 57395288400, <https://orcid.org/0000-0001-7714-2742>